

Spannungsmessungen im wassergesättigten Boden – Ein neues Messsystem

*Roland Riggert¹, Heiner Fleige¹,
Nina Stoppe-Struck², Rainer Horn¹*

Zusammenfassung

Um Stabilitätsbewertungen von Uferböden durchführen zu können, müssen neben Bodenstabilitätsparametern wie der Vorbelastung oder dem Scherwiderstand außerdem die auf das Ufer einwirkenden Kräfte quantifiziert werden. Aus diesem Grund wurden Spannungsmessungen von Schiffswellen im Nord-Ostsee-Kanal bei Kiel vorgenommen. Für die Bestimmung der drei Raum gerichteten Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 , der mittleren Normal- (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) wurde eine modifizierte Form des Stress-State-Transducer-Systems (SST) entwickelt und erstmalig eingesetzt. Die Neukonstruktion (Watt-SST) mit einem austauschbaren Akku und wasserabgedichteten Messkomponenten ermöglicht den Einsatz im Wasser und im wassergesättigten Boden über längere Messperioden

von bis zu vier Tagen ohne Akkuwechsel. Die Sensorköpfe wurden unter und über der mittleren Wasseroberfläche positioniert, um den Wellenschlag und eine mögliche Sogwirkung bei der Passage von Schiffen quantifizieren zu können. Während zwei Messperioden wurden verschiedene Schiffstypen (Containerschiff, Tanker, Frachter und Katamaran) gemessen. Die Ergebnisse zeigen je nach Schiffstyp unterschiedliche Wellenmuster (Periode sowie Ausprägung). Bei den Messungen wurden Spannungswerte von bis zu drei kPa beobachtet. Die ersten Ergebnisse verdeutlichen außerdem, dass eine Optimierung hinsichtlich Einbau und Platzierung der Sensoren im Wasser und Boden erfolgen muss, wenn die maximalen Spannungsspitzen beim Brechen einer Welle erfasst werden sollen.

Schlüsselworte

Schiffswellen, Bodenstabilität, Spannungsmessungen, Hauptspannungen, Stress State Transducer System

¹ Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

² Institut für Bodenkunde- Leibniz Universität Hannover

Einleitung

Durch den Umbau von befestigten Uferanlagen zurück zum natürlichen Zustand der Wasserschiffahrtsstraßen stellt sich an viel Trassen die Frage nach der Stabilität dieser natürlichen Ufer und den Auswirkungen des Wellenschlages von Schiffen. Um verlässliche Stabilitätsbewertungen durchführen zu können, müssen zum einen bodenphysikalische Parameter erhoben und zum anderen die auf den Boden einwirkenden Kräfte bestimmt werden.

Neugebauer (2015) und Stoppe (2015) führten umfassende Stabilitätsuntersuchungen entlang der Tide-Elbe in Deutschland von der Elbe-Mündung bei Cuxhaven bis Geesthacht durch. In der Studie wurden an 24 Standorten die Stabilitätsparameter Trockenrohdichte, Vorbelastung und Scherwiderstand sowie rheologische Parameter erfasst und bewertet.

Für die Bestimmung der Belastungen durch Wellen oder Gezeiten auf die Uferböschungen sind aufwendigere Untersuchungen nötig. Um die gesamte Energie (kinetisch und statisch), welche bei Anlanden der Wellen auf den Boden übertragen wird, zu quantifizieren, müssen zeitgenaue und hochauflösende Spannungsmessungen durchgeführt werden.

Das Stress State Transducer System (Horn et al., 1992) ist ein Messsystem, welches aufgrund seiner speziellen Konstruktion in der Lage ist, Spannungen im dreidimensionalen Raum zu erfassen und richtungsspezifische Belastungsvektoren zu erstellen. Das System wurde jedoch in der Vergangenheit ausschließlich zur Untersuchung der Auswirkungen von Forst- und Landmaschinen eingesetzt (Riggert et al., 2016). Für den Einsatz im wassergesättigten Boden bzw. im Wasser musste das System entsprechend modifiziert werden.

Mit der Neuentwicklung wurden Spannungsmessungen von Schiffswellen im Nord-Ostsee-Kanal bei Kiel vorgenommen. Jährlich passieren rund 30.000 Schiffe den Kanal wobei ca. 40 % auf Mehrzweckfrachter, 25 % auf Tanker und 16 % auf Container entfallen (WSV, 2017). Die Vielfalt der Schiffe soll genutzt werden, um die Wellenbilder von unterschiedlichen Schiffstypen zu bestimmen und somit eine mögliche Degradation von Uferböden durch Wellenschlag oder Sogwirkung abzuschätzen.

Material & Methoden

In dem neu entwickelten Watt-SST, welches vom Aufbau dem Stress State Transducer System (SST-Kiel3) gleicht, wurden die Dehnmessstreifen durch hochempfindliche Druckaufnehmer ersetzt und wasserdicht verbaut. Die neuen Druckaufnehmer können Drücke zwischen 0 und 2000 hPa mit einer Rate von bis zu 40 Hz messen und sind somit deutlich sensibler, sowohl in der zeitlichen als auch in der messbaren Auflösung.

Um eine dauerhafte Datenmessung zu ermöglichen, wurde der Messrechner in ein wasserdichtes Gehäuse eingebaut, welches direkt über wassergeschützte Kabelverbindung mit den drei Sensorköpfen verbunden ist (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1. Gestell mit den drei Sensoren (Mitte) des Watt-SST mit austauschbarem Akku (links) und Messrechner (rechts).

Das neue Messsystem wurde erstmals im Bereich der Kanalfähre in Landwehr (Kilometer 86,8) am Nord-Ostsee-Kanal in der Nähe von Kiel eingesetzt. Bei den ersten Messungen wurden die Schiffe Agnes Essberger (Tanker), Deveron (Katamaran), Ida Rambow (Containerschiff) und Kamelia (Frachter) vom Messsystem erfasst (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2. Die Schiffe Agnes Essberger (oben links), Deveron (oben rechts), Ida Rambow (unten links) und Kamelia (unten rechts) bei der Passage der Messstelle nahe in Kiel im Nord-Ostsee-Kanal bei Kilometer 86,8.

Ergebnisse

In Abbildung 3 sind die drei errechneten Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), die mittlere Normalspannung (MNS) und die oktaedrische Scherspannung (OCTSS) farbspezifisch für einen Sensor bei Durchfahrt der *Agnes Essberger* dargestellt. Die Werte der drei Hauptspannungen sowie die MNS fallen nach ca. 30 Sekunden um rund 20 hPa ab,

befinden sich anschließend ca. 25 Sekunden auf einem Niveau, bevor sie wieder ansteigen. Im folgenden Verlauf lassen sich für alle vier Spannungskomponenten kleinere Wellenbewegungen beobachten. Nach rund 300 Sekunden wird das Ausgangsniveau wieder erreicht. Bei σ_3 ist das Minimum von -22 hPa zu verzeichnen. Die OCTSS verläuft bei einem Wert knapp über 0 hPa nahezu konstant über die gesamte Messperiode.

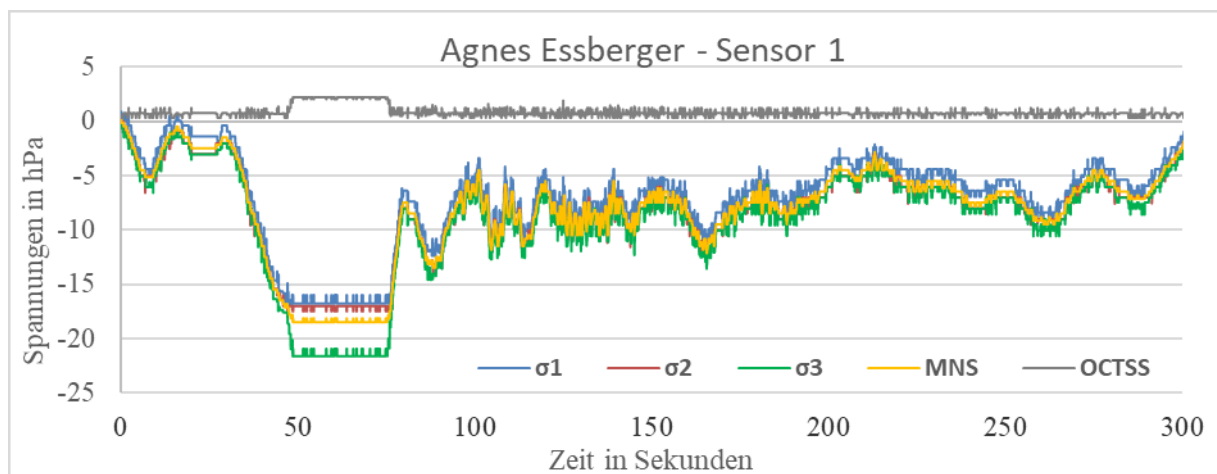


Abbildung 3. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) bei Durchfahrt der *Agnes Essberger*.

Im Unterschied zur *Agnes Essberger* sind die Verläufe der einzelnen Spannungen bei Durchfahrt des Katamarans *Deveron* nahezu identisch und weisen keine deutliche Abnahme auf (vgl. Abbildung 4). Bis auf die OCTSS verlaufen die anderen Spannungen in einer ausgedehnten Wellenform mit einem Wellenberg (+2,3 hPa) bei rund 60 Sekunden und einem Wellental bei rund 135 Sekunden (-5 hPa) über die gemessene Dauer von rund 180 Sekunden. Allerdings fallen kurze periodische Wellen nach ca. 100

Sekunden auf und halten bis zum Messende (180 Sekunden) an. Die drei Hauptspannungen sowie die MNS durchlaufen annähernd alle drei Sekunden einen An- und Abstieg von ca. 5 hPa. Wie zuvor bei der *Agnes Essberger* ist keine Bewegung der OCTSS zu verzeichnen. Sie verläuft über die gesamte Messperiode bei Werten zwischen 0 und 1 hPa nahezu konstant.

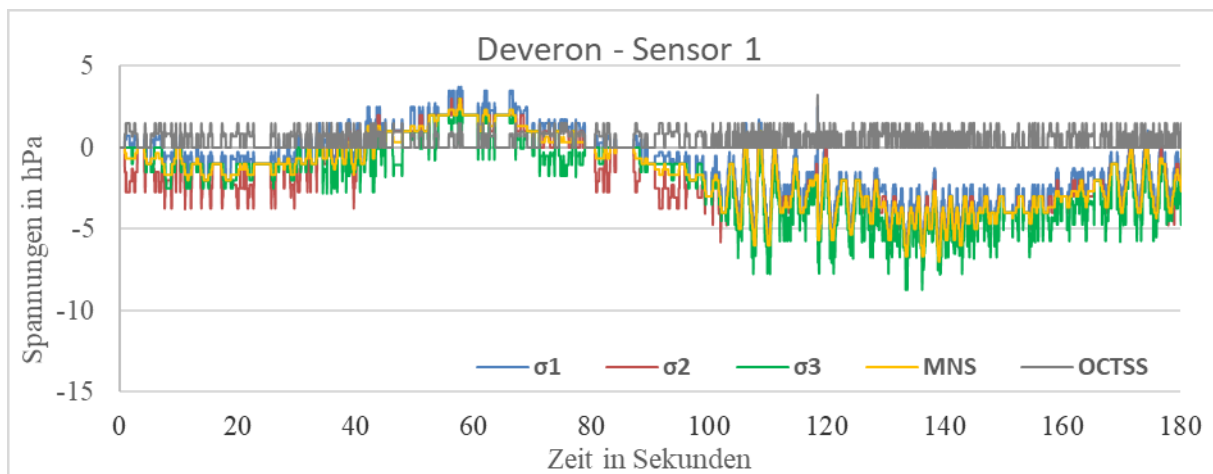


Abbildung 4. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) bei Durchfahrt der Deveron.

Das Containerschiff *Ida Rambow* erzeugte ein ähnliches Spannungsbild wie die *Agnes Essberger* (siehe Abbildung 5). Die OCTSS schwankt bis auf das maximale Plateau (Werte bei 3,5 hPa) wieder konstant zwischen null und einem hPa. Die anderen Spannungen fallen zunächst ab, bilden ein Minimum-Plateau (σ_3 : -18 hPa) aus und steigen anschließend wieder an. Anders als bei der *Agnes Essberger* steigen die Spannungen jedoch innerhalb weniger Sekunden (5 bis 10 Sekunden) wieder auf den Ur-

sprungswert an. Auffällig ist ein Zwischenhoch von σ_3 während des Minimum-Plateaus. Nachdem die Spannungen den Ausgangszustand wieder erreicht haben, lassen sich fünf bis sechs kleine Wellen mit einer Periode von rund sechs Sekunden beobachten (Schwankungen von rund 5 hPa). Nach rund 180 Sekunden verzeichnet der Sensor ein Wellental (Werte bei ca. -5 hPa) und nach 290 Sekunden einen Wellenberg (Werte bei 10 hPa).

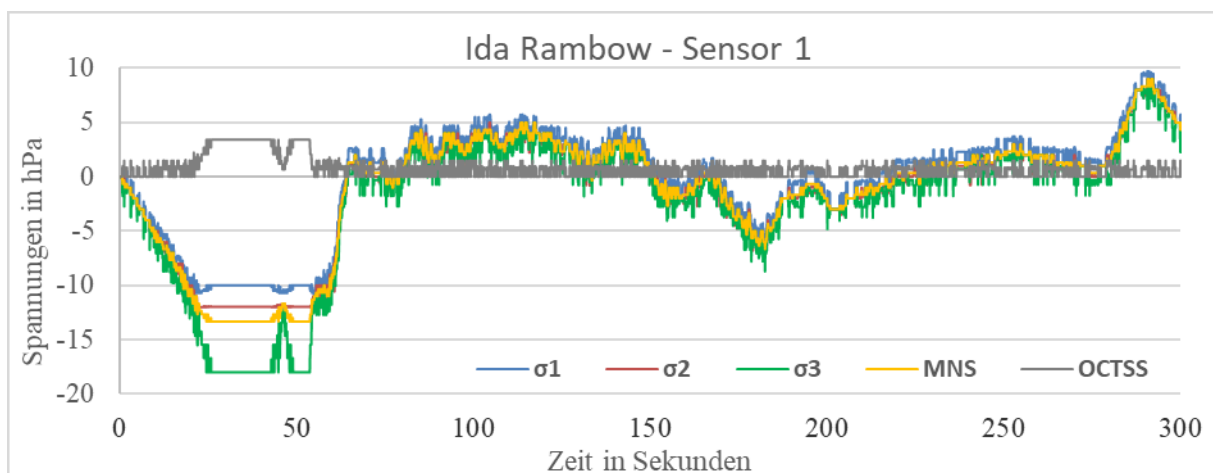


Abbildung 5. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) bei Durchfahrt der *Ida Rambow*.

In Abbildung 6 sind die Messwerte während der Durchfahrt des Frachtschiffes *Kamelia* dargestellt. Ähnlich wie bei den anderen beiden Frachtschiffen ist auch bei der *Kamelia* zunächst eine deutliche Abnahme der drei Hauptspannungen sowie der MNS zu erkennen. Die OCTSS zeigt wie auch zuvor bis auf das leicht ausgeprägte Maximal-Plateau keine Veränderungen. Die Abnahme der anderen Spannungen geht jedoch deutlich langsamer vonstatten als bei der *Agnes Essberger* bzw. der *Ida Rambow*.

Das Minimum-Plateau wird erst nach 120 Sekunden erreicht. Die anhaltende Zeit dieses Plateaus ist jedoch mit der Dauer bei den anderen Schiffen zu vergleichen. Die Minimalwerte werden von der dritten Hauptspannung (-20 hPa) erzielt. Nach dem Minimum-Plateau steigen sie wieder an, jedoch nicht sofort zurück aufs Ausgangsniveau, welches erstmalig wieder nach ca. 190 Sekunden durch einen Wellenberg erreicht wird. Dieses Muster wurde bereits bei der *Agnes Essberger* beobachtet.

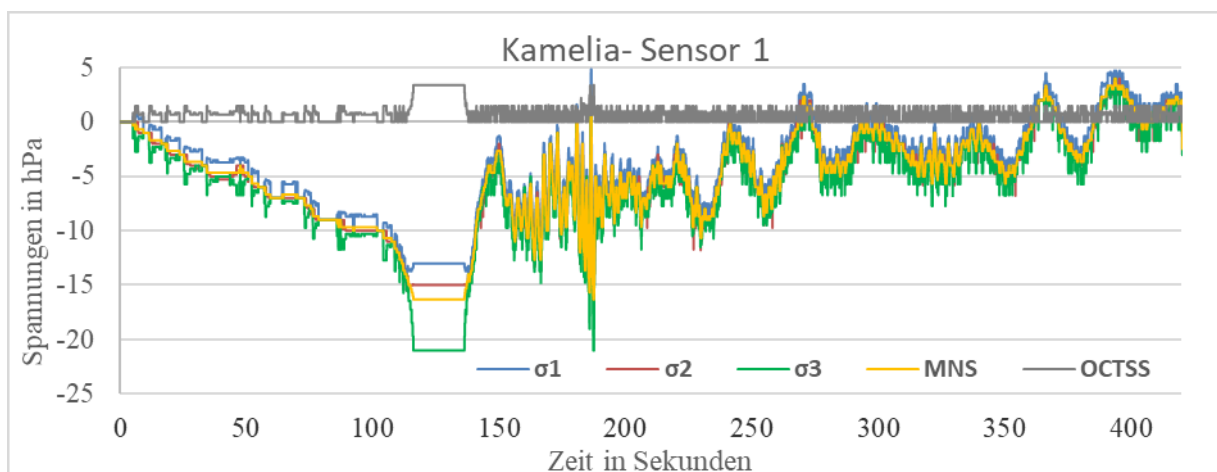


Abbildung 6. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) bei Durchfahrt der *Kamelia*.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Wellenmuster und Spannungseinträge in Abhängigkeit vom Schiffstyp. Der Kataran Deveron erzeugt sogenannte Sekundärwellen, welche auch bei der *Kamelia* zu beobachten sind. Bei den drei größeren Schiffen sind zusätzlich Primärwellen zu erkennen. Des Weiteren sind

dort Abnahmen der Spannungen (Absenk) während der Passage zu beobachten. Die gemessenen Spannungswerte variieren zwischen 5 und 30 hPa und fallen im Vergleich zu anderen SST-Messungen bei terrestrischen Böden gering aus. Jedoch spiegeln die Ergebnisse nicht die maximale Belastung, welche zum Beispiel während des Brechens einer Welle erzeugt wird, wider.

Dafür muss zukünftig ein optimierter Einbau, am Übergang vom Wasser zur Uferböschung im gesättigten Boden erfolgen. Außerdem sollten für eine Stabilitätsbewertung der Ufer bodenmechanische Parameter wie die Vorbelastung oder Scherparameter sowie die Porenwasserdrücke bestimmt werden.

Literatur

- Horn, R., Johnson, C., Semmel, H., Schafer, R. and M. Lebert (1992): *Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden - theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse*. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde** 155, 269–274.
- Neugebauer, T. (2015): *Bodenphysikalische Untersuchungen an Uferböden der Tideelbe als Grundlage für die Pronose des Kompressibilitätsindex als Maß für den Widerstand gegen Wellenschlag*. **Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel**, Band 109, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 114 pp.
- Riggert, R., Fleige, H., Kietz, B., Gaertig, T. and R. Horn (2016): *Stress distribution under forestry machinery and consequences for soil stability*. **Soil Science Society of America Journal** 80, 38–47.
- Stoppe, N. (2015): *Rheologische Untersuchungen an tidebeeinflussten Uferböden der Elbe als Grundlage für die Entwicklung mikromechanischer Pedotransferfunktionen*. **Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Band 106, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 151 S.
- WSV (2017): *Der Nord-Ostsee-Kanal – international und leistungsstark*. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung der Bundes, www.gdws.wsv.bund.de

Danksagung

Ein großer Dank geht an die Bundesanstalt für Gewässerkunde für die finanziellen Mittel und die Ideen zur Umsetzung des neuentwickelten Messsystems.